

Impacts d'une politique de dépollution dans un modèle à la Heckscher-Ohlin dynamique

M. Germain

Discussion Paper 2005-10

Département des Sciences Économiques
de l'Université catholique de Louvain



UCL

Impacts d'une politique de dépollution dans un modèle à la Heckscher-Ohlin dynamique.*

Marc Germain[†]

Avril 2005

Abstract

L'article vise à déterminer les impacts d'une politique de réduction des émissions polluantes dans le cadre d'un modèle d'une petite économie ouverte, comprenant deux régions et deux secteurs, avec croissance endogène. L'un des deux secteurs est relativement plus polluant et l'une des deux régions est plus spécialisée dans la production de ce secteur. L'impact de la politique environnementale sur les secteurs dépend crucialement de leurs taux de croissance respectifs, qui dépendent à leur tour de leurs dotations initiales de capital respectives. Des résultats a priori contre-intuitifs sont possibles. Si le taux de croissance du secteur intensif en émissions polluantes est suffisamment faible et inversement pour l'autre secteur, alors le secteur relativement plus polluant est moins affecté par la politique environnementale que l'autre secteur. De même, la région la plus spécialisée dans la production du bien polluant est moins affectée que l'autre région par la politique de réduction des émissions, si elle se caractérise par des taux de croissance sectoriels suffisamment faibles en regard de ceux de l'autre région.

*Cette recherche fait partie du projet GREENMOD2, intitulé "Un modèle dynamique multisectoriel régional et global de l'économie belge pour des analyses d'impacts, de scénarios et d'équité", financé par la Politique scientifique fédérale, dans le cadre du Deuxième Plan pluri-annuel d'appui scientifique à une politique de Développement Durable (PADD II). L'auteur remercie vivement Philippe Monfort pour sa revue de l'article.

[†]Center for Operational Research and Econometrics (CORE) et Département d'Economie, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique.

Introduction

L'allocation de permis d'émission, notamment celle s'inscrivant dans le cadre du Protocole de Kyoto pour six gaz à effet de serre (GES), a suscité de vives discussions politiques sur la question de savoir qui (quel pays ou quelle région) devrait supporter un effort plus ou moins important et quelle serait la manière adéquate de distribuer les quotas de permis entre les entités affectées par le Protocole. En Belgique (Etat fédéral comportant trois régions, la Flandre, la Wallonie et la Région de Bruxelles-Capitale), le débat a opposé longtemps les régions flamande et wallonne, avant qu'un accord ne soit finalement trouvé¹. Par rapport aux autres régions, la région wallonne est en effet caractérisée par une industrie davantage consommatrice d'énergie. La Flandre voulait voir le gros de l'effort de réduction des émissions se concentrer en Wallonie (là où les réductions d'émission sont présumées les moins chères), tandis que la Wallonie estimait qu'une telle solution lui aurait été par trop défavorable. Au Canada, certaines provinces, dont l'Alberta qui concentre nombre d'activités émettrices de GES, se sont fermement opposées à la ratification du Protocole de Kyoto par ce pays (Nolet et Blais, 2002), avant que le Canada ne ratifie finalement le Protocole de Kyoto en décembre 2002.

Or, dans le cadre du débat sur le partage de la charge, il importe de souligner que le fait que les activités d'un pays (ou région) soient davantage consommatrices d'énergie ne résulte pas forcément de leur inefficacité. Il peut aussi résulter de la spécialisation de ce pays dans la production de biens relativement exigeants en énergie pour leur fabrication, spécialisation elle-même conditionnée par ses avantages comparatifs, et dont l'exploitation à travers l'échange est susceptible de bénéficier aux différents pays participant à ce dernier.

Au moyen d'un modèle d'une petite économie ouverte multi-régionale, où l'une des régions est plus spécialisée dans la production de biens et services intensifs en émissions polluantes, Bréchet, Germain et Monfort (2004) montrent que le bien-être de cette dernière est plus affecté que celui des autres régions par la hausse du coût de l'énergie induite par l'effort national de réduction des émissions. Les impacts de la politique nationale de réduction des émissions sur les régions peuvent cependant être modulés en jouant sur les dotations de permis de pollution attribuées à chacune d'elles, et ce, que le marché de permis soit domestique ou international.

L'analyse de Bréchet, Germain et Monfort (2004) présente cependant la limite d'être statique. Or, les dotations de facteurs d'une région à la base de sa spécialisation sont susceptibles d'évoluer au cours du temps. Il en ira par conséquent de même au niveau des impacts sur cette région d'une politique

¹Pour plus de détails, le lecteur intéressé est renvoyé à l'arrêté royal du 28 octobre 2004, fixant les modalités de gestion du fonds pour le financement de la politique fédérale de réduction des émissions de gaz à effet de serre (cfr. <http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi/welcome.pl>).

environnementale de long terme, à l'exemple de celle visant à lutter contre le réchauffement climatique.

Dans un contexte à la Heckscher-Ohlin dynamique où le capital peut s'accumuler, deux régions (ou deux pays) qui partagent des préférences et technologie identiques et qui ne se différencient que par leurs dotations relatives de facteurs *initiales*, vont converger pour avoir à long terme la même dotation relative de facteurs, et donc la même spécialisation (Chen, 1992). Dans ce cas, et dans la mesure où celle-ci conditionne les impacts de la politique de réduction des émissions sur les régions, une région au départ plus affectée que les autres parce qu'initialement spécialisée dans la production de biens intensifs en énergie ne le sera plus une fois le processus de convergence achevé.

Les considérations du paragraphe précédent sont obtenues dans un contexte de croissance néoclassique où l'accumulation du capital est soumise à des rendements décroissants. Dans le cadre d'un modèle de croissance endogène, c'est-à-dire avec rendements non-décroissants (Romer, 1986), la convergence n'est plus garantie. L'écart initial entre dotations relatives de facteurs peut aller en s'accroissant, approfondissant ainsi les différences de spécialisation des régions au cours du temps. Il y a alors peu de chances que les impacts à long terme de la politique environnementale s'uniformisent selon les régions.

Par ailleurs, il importe de souligner que si la spécialisation d'une région influence les impacts de la politique environnementale sur son bien-être, l'inverse est également susceptible d'être vrai. On pourrait en effet s'attendre à ce que les contraintes de réduction des émissions, qui ont pour premier effet d'augmenter le coût total de l'énergie (par exemple à travers le prix des permis d'émission), poussent les régions vers une spécialisation moins intensive en énergie, et ce d'autant plus qu'elles sont initialement spécialisées dans la production de biens polluants.

Le but de cette contribution est d'analyser, au moyen d'un modèle à la Heckscher-Ohlin dynamique, les impacts d'une politique de réduction des émissions dans le cadre d'une petite économie ouverte, bi-régionale et bi-sectorielle, où les régions se caractérisent par une spécialisation différente en termes de production de biens et services². Les deux secteurs produisent respectivement des biens d'investissement et de consommation, au moyen de capital et d'énergie. La consommation énergétique s'accompagne d'émissions polluantes. Le secteur producteur de biens d'investissement est plus intensif en énergie, et l'une des deux régions est plus spécialisée dans la production de ce type de biens. Le modèle est à deux périodes afin de permettre de distinguer les effets de la politique

²Le présent papier se situe donc à l'intersection de la théorie du commerce international et de l'économie de l'environnement, à l'exemple (entre autres) de la contribution de Antweiler et al (2001) et de celles reprises dans le livre de Batabyal et Beladi (2001)). Plus spécifiquement, deux articles dans la même veine développant (comme le présent papier) un modèle dynamique d'une petite économie ouverte sont ceux de Copeland et Taylor (1997) et Lee et Batabyal (2002).

environnementale sur les secteurs et sur les régions à court et à long termes. Le modèle est à croissance endogène, au sens où l'accumulation du capital (compris dans un sens large) est à rendements croissants, la productivité totale des facteurs au niveau de la firme étant une fonction croissante du capital *total* accumulé dans le secteur régional auquel elle appartient.

La politique environnementale consiste à obliger à chaque période les firmes polluantes à détenir des permis en fonction de leurs émissions, permis qui peuvent être échangés sur un marché international à chaque période. L'Etat d'une région reçoit une certaine dotation de permis à chaque période, qu'il vend aux pollueurs. L'impact de la politique de réduction des émissions sur les secteurs et régions est mesuré par rapport à une situation de laissez-faire (business as usual (BAU)), correspondant à des dotations et des prix de permis nuls.

La structure du papier est la suivante. La section 1 décrit le modèle. Sont en particulier décrits les agents qui interviennent dans chaque région, ainsi que les flux macroéconomiques intervenant entre eux à chaque période. La section 2 présente le problème de la firme. Dans la section 3, on commence par formuler l'hypothèse de croissance endogène du modèle. On définit ensuite un indice mesurant la divergence de spécialisation entre régions. A cause de l'hypothèse de croissance endogène, cette divergence de spécialisation peut s'accroître, se réduire, voire s'inverser au cours du temps, et ce en fonction des dotations initiales de capital des secteurs dans chaque région. Dans la section 4, on énonce une série d'hypothèses permettant de simplifier l'analyse de la politique environnementale développée par la suite. Les effets de cette politique sont d'abord mesurés sur les profits courants des secteurs (section 5), ensuite sur la somme de leurs profits actualisés (section 6). L'impact de la politique de réduction sur la somme des profits actualisés des secteurs dépend crucialement de leurs dotations initiales de capital. On ne peut exclure, en particulier, que le secteur des biens de consommation soit plus affecté par la politique environnementale que le secteur des biens d'investissement, alors que ces derniers sont pourtant plus intensifs en énergie. L'analyse se poursuit par la comparaison des effets de la politique sur les revenus régionaux (section 7), ce qui permet de déterminer un exemple de situation où la région la plus spécialisée dans la production de biens d'investissements est cependant moins atteinte par la politique environnementale que l'autre région. Par ailleurs, l'analyse des impacts de la politique sur les revenus à court et à long termes montre que la baisse des revenus est plus forte à long terme (section 8). La conclusion résume les principaux résultats obtenus et décrits différentes extensions possibles.

1 Préliminaires

Le modèle est celui d'une petite économie ouverte, multi-régionale et multi-sectorielle. Il est dynamique et comprend 2 régions indicées par i ($i = v, w$), 2 secteurs (ou 2 biens) indicés par j ($j = a, b$), 2 facteurs qui sont le capital (k) et l'énergie (e), 2 périodes indicées par t ($t = 1, 2$).

Dans chaque région, les acteurs en présence (qui vivent 2 périodes) sont les firmes des deux secteurs, les ménages, l'Etat, le Reste du Monde. Le facteur capital est compris dans un sens très large (comprenant le capital physique, les infrastructures, l'état des connaissances,...). S'agissant d'une petite économie ouverte, les agents sont supposés price-taker, les prix étant imposés par le Reste du Monde et donc exogènes. Le secteur a produit les biens d'investissement, le secteur b produit les biens de consommation. La technologie ne dépend que du secteur, et est la même à travers les deux régions. Les entreprises d'une région sont supposées être la propriété exclusive des ménages de la même région³. Biens nationaux et biens importés sont parfaitement substituables. Une unité d'énergie consommée produit une unité de pollution. e représente donc à la fois la consommation énergétique et la pollution. L'ensemble des variables et des paramètres du modèle sont repris en Annexe A.

Les flux entre agents macroéconomiques de la région i à la date t sont décrits par les tableaux suivants ($t = 1, 2$) :

$t = 1$	Secteur a	Secteur b	Ménages	Etat	RM
Secteur a	$p_{a1}i_{ia1}$	$p_{a1}i_{ib1}$	0	0	$p_{a1}z_{ia1}$
Secteur b	0	0	$p_{b1}c_{i1}$	0	$p_{b1}z_{ib1}$
Ménages	π_{ia1}	π_{ib1}	0	$\tau_1\bar{e}_{i1}$	0
Etat	0	0	0	0	$\tau_1\bar{e}_{i1}$
RM	q_1e_{ia1} τ_1e_{ia1}	q_1e_{ib1} τ_1e_{ib1}	0	0	0
Epargne	0	0	B_{i1}^m	0	B_{i1}^e

$t = 2$	Secteur a	Secteur b	Ménages	Etat	RM
Secteur a	$p_{a2}i_{a2}$	$p_{a2}i_{ib2}$	0	0	$p_{a2}z_{ia2}$
Secteur b	0	0	$p_{b2}c_{i2}$	0	$p_{b2}z_{ib2}$
Ménages	π_{ia2}	π_{ib2}	0	$\tau_2\bar{e}_{i2}$	0
Etat	0	0	0	0	$\tau_2\bar{e}_{i2}$
RM	q_2e_{ia2} τ_2e_{ia2}	q_2e_{ib2} τ_2e_{ib2}	0	0	0
Intérêts	0	0	rB_{i1}^m	0	rB_{i1}^e
Epargne	0	0	$\underbrace{B_{i2}^m - B_{i1}^m}_{=0}$	0	$\underbrace{B_{i2}^e - B_{i1}^e}_{=0}$

³Cette hypothèse forte est énoncée par soucis de simplicité. Elle n'intervient que dans le cadre des sections 7 et 8 consacrées à l'analyse des impacts de la politique environnementale sur les revenus des ménages.

Ce tableau décrit un scénario où l'Etat régional reçoit une dotation de permis $(\tau_t \bar{e}_{it})$ de l'étranger, qu'il vend sur le marché international. La recette est versée aux ménages de la région sous la forme d'un transfert forfaitaire. Avec le produit de sa production $(p_{jt} y_{ijt})$, la firme du secteur j (i) paie au Reste du Monde sa consommation énergétique $(q_t y_{ijt})$, (ii) achète sur le marché international les permis dont elle a besoin $(\tau_t e_{ijt})$ et (iii) achète ses investissements $(p_{at} i_{ijt})$ au secteur a , le profit résiduel (π_{ijt}) étant distribué intégralement aux ménages de la même région. Il s'ensuit que l'épargne des entreprises est nulle à chaque période. Avec les revenus versés par les entreprises et le transfert reçu de l'Etat régional, les ménages achètent des biens de type b . La différence (z_{ijt}) entre la production régionale du bien j et sa consommation régionale est absorbée ou fournie par le Reste du Monde. On vérifie donc pour chaque région et chaque période que

$$y_{iat} = i_{iat} + i_{ibt} + z_{iat} \quad (1)$$

$$y_{ibt} = c_{it} + z_{ibt} \quad (2)$$

Si les ménages dégagent une épargne en première période (B_{i1}^m) , ils en reçoivent le remboursement et les intérêts (rB_{i1}^m) en deuxième période de la part du Reste du Monde⁴, et inversement s'ils s'endettent. Ceci garantit que tous les stocks de créances ou dettes sont nuls en fin de deuxième période $(B_{i2}^m = B_{i1}^e)$.

2 Le problème de la firme

La technologie est représentée par une fonction de production Cobb-Douglas à rendements décroissants $(\alpha_j + \beta_j < 1)$ ⁵ :

$$y_{ijt} = A_{ijt} k_{ijt}^{\alpha_j} e_{ijt}^{\beta_j} \quad (3)$$

La firme représentative du secteur j de la région i choisit sa consommation énergétique et son investissement de façon à maximiser la somme de ses profits actualisés sur les deux périodes :

$$\Pi_{ij} = \max_{\{e_{ijt}, i_{ijt}\}_{t=1,2}} \sum_{t=1,2} \frac{\pi_{ijt}}{[1+r]^{t-1}} \quad (4)$$

où, par définition

$$\pi_{ijt} = p_{jt} A_{ijt} k_{ijt}^{\alpha_j} e_{ijt}^{\beta_j} - q_t e_{ijt} - p_{at} i_{ijt} - \tau_t e_{ijt} \quad (5)$$

et sous contrainte que

$$k_{ijt} = k_{ij,t-1}[1 - \delta_j] + i_{ijt}, \quad t = 1, 2 \quad (6)$$

⁴Et donc éventuellement de l'autre région, puisque dans le cadre de ce modèle, du point de vue d'une région, l'autre fait partie du Reste du Monde.

⁵Cette hypothèse est nécessaire vu qu'il n'y a pas de limites à la production et à la consommation de facteurs.

k_{ij0} étant donné. Les conditions du premier ordre conduisent à :

$$\frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial e_{ijt}} = 0 \Rightarrow \beta_j p_{jt} A_{ijt} k_{ijt}^{\alpha_j} e_{ijt}^{\beta_j - 1} = q_t + \tau_t, \quad t = 1, 2 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial i_{ij2}} = 0 \Rightarrow \alpha_j p_{j2} A_{ij2} k_{ij2}^{\alpha_j - 1} e_{ij2}^{\beta_j} = p_{a2} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial i_{ij1}} &= 0 \Rightarrow \alpha_j p_{j1} A_{ij1} k_{ij1}^{\alpha_j - 1} e_{ij1}^{\beta_j} + \frac{1 - \delta_j}{1 + r} \alpha_j p_{j2} A_{ij2} k_{ij2}^{\alpha_j - 1} e_{ij2}^{\beta_j} = p_{a1} \\ &\Rightarrow \alpha_j p_{j1} A_{ij1} k_{ij1}^{\alpha_j - 1} e_{ij1}^{\beta_j} = p_{a1} - p_{a2} \frac{1 - \delta_j}{1 + r} \end{aligned} \quad (9)$$

Posons $\tilde{p}_{j1} = p_{a1} - p_{a2} \frac{1 - \delta_j}{1 + r}$ et $\tilde{p}_{j2} = p_{a2}$ comme étant les coûts d'usage du capital du secteur j aux temps $t = 1, 2$. $\tilde{q}_t = q_t + \tau_t$ est le coût total de l'énergie. Les équations précédentes conduisent à

$$e_{ijt} = \frac{\beta_j \tilde{p}_{jt}}{\alpha_j \tilde{q}_t} k_{ijt} \quad (10)$$

La substitution de (10) dans (8) et (9) permet d'isoler le capital, la consommation énergétique et la production en fonction du coefficient d'efficacité A_{ijt} et des exogènes :

$$k_{ijt} = \left[p_{jt} A_{ijt} \left[\frac{\alpha_j}{\tilde{p}_{jt}} \right]^{1 - \beta_j} \left[\frac{\beta_j}{\tilde{q}_t} \right]^{\beta_j} \right]^{\frac{1}{1 - \alpha_j - \beta_j}} \quad (11)$$

$$e_{ijt} = \left[p_{jt} A_{ijt} \left[\frac{\alpha_j}{\tilde{p}_{jt}} \right]^{\alpha_j} \left[\frac{\beta_j}{\tilde{q}_t} \right]^{1 - \alpha_j} \right]^{\frac{1}{1 - \alpha_j - \beta_j}} \quad (12)$$

$$y_{ijt} = \left[p_{jt}^{\alpha_j + \beta_j} A_{ijt} \left[\frac{\alpha_j}{\tilde{p}_{jt}} \right]^{\alpha_j} \left[\frac{\beta_j}{\tilde{q}_t} \right]^{\beta_j} \right]^{\frac{1}{1 - \alpha_j - \beta_j}} \quad (13)$$

Les expressions précédentes permettent d'exprimer les parts des facteurs de production dans la production :

$$\tilde{p}_{jt} k_{ijt} = \alpha_j p_{jt} y_{ijt} \quad (14)$$

$$\tilde{q}_t e_{ijt} = \beta_j p_{jt} y_{ijt} \quad (15)$$

3 Croissance endogène et spécialisation

A la façon de la théorie de la croissance endogène, les coefficients d'efficacité sont supposés dépendent du stock de capital total accumulé par le secteur de la région au début de la période⁶. Si on suppose un équilibre symétrique entre N

⁶Etant à deux périodes et à croissance endogène, le modèle est de ce point de vue proche du premier modèle de Romer (1986). Ce dernier est cependant celui d'une économie fermée.

firmes identiques, le stock de capital total de l'économie est égal à N fois celui de la firme représentative, et il est alors équivalent (à une constante multiplicative près) d'exprimer les coefficients d'efficacité comme une fonction du capital de cette dernière. Formellement, on suppose que :

$$A_{ijt} = k_{ij,t-1}^{\gamma_j} \quad (16)$$

A noter que cette expression suppose une dépendance qui se différencie entre secteurs et entre régions. D'autres formulations sont possibles, par exemple en fonction du capital total de l'économie. Si N est grand, on peut considérer que la firme est trop petite pour pouvoir influencer le capital total du secteur et de la région correspondants. Ce qui revient formellement à ne pas tenir compte de l'effet de i_{j1} sur A_{ij2} dans le calcul de (4).

La substitution de (16) dans la fonction de production (3) permet d'écrire⁷ :

$$y_{ijt} = k_{ij,t-1}^{\gamma_j} k_{ijt}^{\alpha_j} e_{ijt}^{\beta_j}, \quad t = 1, 2 \quad (17)$$

La production de la firme s'exprime donc comme une fonction du capital (courant) de la firme, de l'énergie consommée, et du capital hérité de la période précédente. L'expression (17) permet de distinguer entre les rendements d'échelle *privés* (c-à-d au niveau de la firme), mesuré par $\alpha_j + \beta_j < 1$ et qui sont nécessairement décroissants, et les rendements d'échelles *globaux* (c-à-d tenant compte du capital du secteur de la région auquel appartient la firme), mesurés par $\alpha_j + \beta_j + \gamma_j$ et qui peuvent être croissants.

(11) et (16) impliquent que

$$k_{ijt} = \left[p_{jt} k_{ij,t-1}^{\gamma_j} \left[\frac{\alpha_j}{\tilde{p}_{at}} \right]^{1-\beta_j} \left[\frac{\beta_j}{\tilde{q}_t} \right]^{\beta_j} \right]^{\frac{1}{1-\alpha_j-\beta_j}} = \xi_{jt} k_{ij,t-1}^{\varepsilon_j}, \quad t = 1, 2 \quad (18)$$

où par définition

$$\xi_{jt} = \left[p_{jt} \left[\frac{\alpha_j}{\tilde{p}_{at}} \right]^{1-\beta_j} \left[\frac{\beta_j}{\tilde{q}_t} \right]^{\beta_j} \right]^{\frac{1}{1-\alpha_j-\beta_j}} \quad (19)$$

et

$$\varepsilon_j = \frac{\gamma_j}{1 - \alpha_j - \beta_j}, \quad j = a, b \quad (20)$$

Exprimé en fonction de la dotation initiale de capital, le capital du secteur j de la région i évolue donc comme suit :

$$k_{ij1} = \xi_{j1} k_{ij0}^{\varepsilon_j} \quad (21)$$

$$k_{ij2} = \xi_{j2} \xi_{j1}^{\varepsilon_j} k_{ij0}^{\varepsilon_j^2} \quad (22)$$

⁷Une formulation très similaire se retrouve chez John et Pecchenino (1994).

Définissons différents indices qui seront utiles par la suite :

- *indice de croissance du capital du secteur j de la région i au temps t :*

$$g_{ij1} = \frac{k_{ij1}}{k_{ij0}} = \xi_{j1} k_{ij0}^{\varepsilon_j - 1} \quad (23)$$

$$g_{ij2} = \frac{k_{ij2}}{k_{ij1}} = \xi_{j2} k_{ij1}^{\varepsilon_j - 1} = \xi_{j2} \xi_{j1}^{\varepsilon_j - 1} k_{ij0}^{\varepsilon_j(\varepsilon_j - 1)} \quad (24)$$

- *indice de spécialisation de la région i au temps t :*

$$\chi_{it} = \frac{k_{iat}}{k_{ibt}} \quad (25)$$

- *dotation relative en capital du secteur j de la région w au temps t :*

$$\kappa_{jt} = \frac{k_{wjt}}{k_{vjt}} \quad (26)$$

L'indice de croissance (égal à l'unité près au taux de croissance) dépend donc de la dotation initiale de capital, mais aussi des prix relatifs des facteurs par l'intermédiaire des paramètres ξ_{jt} (définis par (19)). Ceux-ci étant donnés, l'indice de croissance est une fonction croissante (resp. décroissante) de k_{ij0} si $\varepsilon_j > 1$ (resp. si $\varepsilon_j < 1$), autrement dit si les rendements d'échelle globaux sont croissants (resp. décroissants)⁸.

Les indices précédents permettent de définir un indice supplémentaire utile à la comparaison interrégionale, à savoir l'*indice de divergence de spécialisation au temps t* :

$$\sigma_t = \frac{k_{wat}}{k_{wbt}} \frac{k_{vbt}}{k_{vat}} = \frac{\chi_{wt}}{\chi_{vt}} = \frac{\kappa_{at}}{\kappa_{bt}} \quad (27)$$

Plus cet indice est différent de l'unité, plus les spécialisations des deux régions sont divergentes.

Comment évoluent ces indices au cours du temps ? Etant donné (21) et (22), on a au niveau de l'indice de spécialisation de la région i :

$$\chi_{i1} = \frac{k_{ia1}}{k_{ib1}} = \frac{\xi_{a1} k_{ia0}^{\varepsilon_a}}{\xi_{b1} k_{ib0}^{\varepsilon_b}} \quad (28)$$

$$\chi_{i2} = \frac{k_{ia2}}{k_{ib2}} = \frac{\xi_{a2} \xi_{a1}^{\varepsilon_a} k_{ia0}^{\varepsilon_a^2}}{\xi_{b2} \xi_{b1}^{\varepsilon_b} k_{ib0}^{\varepsilon_b^2}} \quad (29)$$

et au niveau des dotations relatives en capital :

$$\kappa_{jt} = \frac{k_{wjt}}{k_{vjt}} = \frac{\xi_{jt} k_{wj,t-1}^{\varepsilon_j}}{\xi_{jt} k_{vj,t-1}^{\varepsilon_j}} = \left[\frac{k_{wj0}}{k_{vj0}} \right]^{\varepsilon_j} = \kappa_{j0}^{\varepsilon_j^t}, \quad t = 1, 2 \quad (30)$$

⁸On vérifie en effet que $\varepsilon_j > 1 \Leftrightarrow \alpha_j + \beta_j + \gamma_j > 1$.

Comme les stocks de capital et les indices de croissance (cfr. (21) à (24)), ces indices dépendent des dotations initiales de capital.

Etant donné ce qui précède et (27), l'indice de divergence de spécialisation évolue comme suit :

$$\sigma_t = \left[\frac{k_{wa0}}{k_{va0}} \right]^{\varepsilon_a^t} \left[\frac{k_{vb0}}{k_{wb0}} \right]^{\varepsilon_b^t} = \frac{\kappa_{a0}^{\varepsilon_a^t}}{\kappa_{b0}^{\varepsilon_b^t}}, \quad t = 1, 2 \quad (31)$$

Malgré sa simplicité, l'expression (31) est susceptible de conduire à des évolutions contrastées de l'indice de divergence de spécialisation, et ce, selon les valeurs des paramètres ε_j , mais aussi selon les dotations initiales de capital des régions et des secteurs.

La Figure 1 montre dans le cas particulier où $\varepsilon_a > \varepsilon_b > 1$ comment évolue l'indice de spécialisation en fonction des conditions initiales, c-à-d dans le plan $[\kappa_{a0}, \kappa_{b0}]$. Considérons le cas où la région w est initialement plus spécialisée dans la production du bien a que la région v ($\sigma_0 > 1 \Leftrightarrow \kappa_{a0} > \kappa_{b0}$). Cette dernière inégalité implique que seuls les couples de dotations relatives de capital initiales $(\kappa_{a0}, \kappa_{b0})$ situés sous la bissectrice caractérisée par $\kappa_{a0} = \kappa_{b0}$ sont possibles. Quatre zones apparaissent, délimitées par la bissectrice et les lieux de points $\sigma_0 = \sigma_1$, $\sigma_0 = \sigma_2$, et $\sigma_1 = \sigma_2$ (cfr. l'annexe B pour les détails mathématiques) :

- $\sigma_0 < \sigma_1 < \sigma_2$: l'indice de divergence de spécialisation ne cesse de croître, autrement dit le fait que la région w soit plus spécialisée dans la production du bien a que la région v se renforce au cours du temps. Comme le montre la Figure 1, cette zone est de loin la plus étendue, et est en particulier la seule qui prévaut si $\kappa_{a0} > 1$ ($\Leftrightarrow k_{wa0} > k_{va0}$)⁹.
- $\sigma_0 < \sigma_2 < \sigma_1$: l'évolution de l'indice de spécialisation n'est pas monotone. Les spécialisations des régions divergent dans un premier temps ($\sigma_0 < \sigma_1$), pour ensuite se rapprocher ($\sigma_2 < \sigma_1$). La région w est cependant toujours plus spécialisée dans la production du bien a (puisque $\forall t, 1 < \sigma_t$), et inversement pour v .
- $\sigma_2 < \sigma_0 < \sigma_1$: l'évolution de l'indice de spécialisation n'est à nouveau pas monotone, et contrairement au cas précédent, le différentiel de spécialisation entre régions s'est réduit par rapport à la situation initiale (puisque $\sigma_2 < \sigma_0$). Il est même possible qu'elles se soient inversées, c-à-d que la région w soit en $t = 2$ plus spécialisée dans la production du bien b , et inversement pour v (cfr. infra).
- $\sigma_2 < \sigma_1 < \sigma_0$: l'indice de spécialisation est monotone décroissant, et à nouveau, il est possible que les spécialisations régionales se soient inversées (cfr. infra).

⁹Formellement, ceci s'explique par le fait que $\frac{d\sigma_t}{dt} = \sigma_t \frac{d \ln(\sigma_t)}{dt} = \sigma_t (\varepsilon_a^t \ln(\varepsilon_a) \ln(\kappa_{a0}) - \varepsilon_b^t \ln(\varepsilon_b) \ln(\kappa_{b0}))$, expression qui est toujours positive si $\kappa_{a0} > 1$, dès lors que par hypothèse $\kappa_{a0} > \kappa_{b0}$ et $\varepsilon_a > \varepsilon_b > 1$.

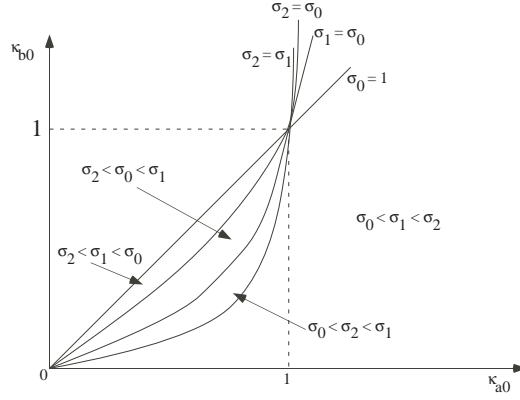


Figure 1:

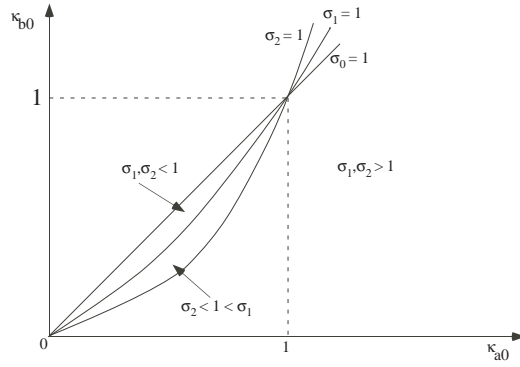


Figure 2:

La Figure 2 donnent les valeurs des rapports de dotations initiales de capital pour lesquelles les spécialisations régionales s'inversent d'une période à l'autre. Partant d'une situation où $\sigma_0 > 1$, il y a inversion des spécialisations si $\sigma_1 < 1$ et/ou $\sigma_2 < 1$. Trois zones apparaissent, délimitées par la bissectrice et les lieux de points $\sigma_1 = 1$ et $\sigma_2 = 1$ (cfr. l'annexe B pour les détails mathématiques). En accord avec la Figure 1, la zone sans inversion ($\sigma_1, \sigma_2 > 1$) est de loin la plus étendue. Une condition nécessaire mais non suffisante pour qu'il y ait inversion est que $\kappa_{a0} < 1 \Leftrightarrow k_{wa0} < k_{va0}$. Il faut en outre que les rapports de dotations initiales ne soient pas situés "trop loin" de la bissectrice (définie par $\kappa_{a0} = \kappa_{b0}$), autrement dit pas trop différents. S'ils sont "suffisamment" proches de la bissectrice, alors l'inversion se produit en $t = 1$ et se reproduit en $t = 2$ ¹⁰.

¹⁰A noter que la configuration des paramètres à la base de la Figure 2 ($\varepsilon_a > \varepsilon_b > 1$) n'autorise pas le cas $\sigma_1 < 1 < \sigma_2$.

Dans le présent modèle donc, les conditions initiales comptent. Ce constat est à opposer avec celui qu'on aurait obtenu si les coefficients d'efficacité se réduisaient à des paramètres de progrès technique (à la Hicks) exogènes ne dépendant que du secteur (comme dans les modèles de croissance exogène) :

$$A_{ijt} = A_j^t \quad (32)$$

avec $A_j > 1$. On montre aisément que $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$, autrement dit les deux régions ont dès la première période la même spécialisation. Dans ce cas, les conditions initiales ne conditionnent pas l'évolution future des spécialisations régionales.

4 Caractérisation de l'économie et de la politique environnementale

La politique environnementale consiste à obliger à chaque période les firmes émettrices à détenir des permis en fonction de leurs émissions. Ces permis peuvent être échangés sur un marché international à chaque période à un prix exogène (τ_t) donné. L'Etat de la région i reçoit une dotation de permis à chaque période (\bar{e}_{it}), qu'il vend aux pollueurs. La politique environnementale est donc entièrement caractérisée par les couples de prix (τ_1, τ_2) et de dotations ($\bar{e}_{i1}, \bar{e}_{i2}$), que l'on peut regrouper dans le vecteur ($\tau_1, \tau_2, \bar{e}_{i1}, \bar{e}_{i2}$). Le but de l'analyse sera par la suite de mesurer l'impact de cette politique sur les revenus des agents par rapport à une situation "business as usual" (BAU), correspondant à des couples de dotations et de prix de permis nuls.

La valeur d'une variable va donc dépendre du scénario envisagé. Par la suite, nous écrirons x_{ijt} (respectivement x'_{ijt}) pour la valeur d'une variable x relative au secteur j de la région i à la période t dans le cadre d'un scénario sans (respectivement avec) politique environnementale. Formellement, x_{ijt} et x'_{ijt} correspondent donc respectivement aux vecteurs $(0, 0, 0, 0)$ et $(\tau_1, \tau_2, \bar{e}_{i1}, \bar{e}_{i2})$.

La politique environnementale est supposée prendre cours dans une économie caractérisée par les hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 : Le secteur a est supposé plus intensif en énergie que le secteur b , au sens où

$$\beta_a > \beta_b \quad (33)$$

Hypothèse 2 : La région w est supposée initialement plus spécialisée dans la production du bien a que la région v , au sens où

$$\chi_{wa0} = \frac{k_{wa0}}{k_{wb0}} > \frac{k_{va0}}{k_{vb0}} = \chi_{va0} \quad (34)$$

$$\Leftrightarrow \kappa_{a0} = \frac{k_{wa0}}{k_{va0}} > \frac{k_{wb0}}{k_{vb0}} = \kappa_{b0} \quad (35)$$

$$\Leftrightarrow \sigma_0 > 1 \quad (36)$$

Hypothèse 3 : le capital d'un secteur se déprécie entièrement pendant la période en cours, ce qui se traduit par

$$\delta_a = \delta_b = 1 \quad (37)$$

Hypothèse 4 : Les rendements d'échelle privés et globaux sont identiques selon les secteurs, au sens où

$$\alpha_a + \beta_a = \alpha_b + \beta_b \text{ et } \gamma_a = \gamma_b \quad (38)$$

Hypothèse 5 : Les rendements d'échelle globaux sont croissants au niveau du secteur j , au sens où

$$\alpha_j + \beta_j + \gamma_j > 1, \quad j = a, b \quad (39)$$

Ces hypothèses appellent quelques commentaires. Parmi les cinq, seules les trois dernières correspondent à des hypothèses simplificatrices destinées à faciliter l'évaluation des impacts de la politique environnementale. Notons que l'Hypothèse 3 n'est pas déraisonnable dans un contexte où les agents vivent deux périodes. Cette hypothèse entraîne que $k_{ijt} = i_{ijt}$ et $\tilde{p}_{jt} = p_{at}$ ¹¹. Les Hypothèses 1 et 4 impliquent que $\alpha_a < \alpha_b$. Le secteur a est donc plus intensif en énergie et moins intensif en capital que le secteur b . Les Hypothèses 4 et 5 impliquent que $\varepsilon_a = \varepsilon_b = \varepsilon > 1$. Ceci et l'Hypothèse 2 impliquent alors que l'indice de divergence de spécialisation va nécessairement croissant ((31) $\Rightarrow \sigma_t = \sigma_0^t$, qui est croissant en fonction de t puisque $\sigma_0 > 1$). On se situe donc dans la zone $\sigma_0 < \sigma_1 < \sigma_2$ de la Figure 1.

Avant de passer à l'analyse des impacts de la politique environnementale, il importe de faire les deux remarques suivantes. Il apparaît d'abord qu'il n'est pas nécessaire de modéliser le comportement des consommateurs. Les firmes produisent uniquement en fonction des prix qui sont exogènes, et non de la demande. Il y a parfaite substitution entre les biens produits par les régions et ceux produits par le Reste du Monde, et ce dernier satisfait toute demande régionale en excès de la production régionale ou importe toute production régionale en excès de la demande régionale. Pour notre propos, l'analyse des impacts de la politique environnementale, il n'est donc pas nécessaire de tenir compte du comportement des consommateurs car il n'a aucune influence sur la production et les émissions des régions.

La deuxième remarque concerne le rôle de l'épargne de permis. Si celle-ci est possible et qu'en revanche l'emprunt de permis n'est pas autorisé¹², et vu le caractère déterministe du modèle, l'arbitrage intertemporel au niveau du marché international de permis se traduit par l'inégalité $\tau_1 \geq \tau_2/(1+r)$ ¹³. Si

¹¹Pour mémoire, $\tilde{p}_{jt} = p_{at} \left[\frac{\delta_j + r}{1+r} \right]^{t-1}$ est le coût d'usage du capital du secteur j .

¹²L'emprunt (au sens d'épargne négative) de permis d'une période d'engagement à l'autre n'est en pratique jamais autorisé.

¹³Si l'emprunt était également possible, l'inégalité serait remplacée par une égalité.

l'inégalité est stricte, aucun agent n'a intérêt à épargner, et on se retrouve dans un contexte sans épargne où le prix des permis est décroissant. Si la contrainte est liante, la possibilité d'épargner est à nouveau sans objet, car il est équivalent pour une firme d'épargner un permis en $t = 1$, ou de le vendre en $t = 1$ et de le racheter en $t = 2$ au Reste du Monde, qui peut acheter ou vendre des permis sans limite. Dans le cadre du présent modèle (petite économie ouverte price-taker et marché de permis international), l'analyse du rôle de l'épargne se limite donc à celle du cas particulier où l'inégalité précédente est satisfaite.

5 Impacts sur les profits sectoriels courants

Le but de cette section est de mesurer l'impact de la politique environnementale sur π_{ijt} , le profit du secteur j de la région i à la période t , par rapport au scénario BAU. L'analyse des impacts sur les profits sectoriels courants n'est pas vraiment intéressante en soi, mais elle se révélera en revanche très utile pour les sections ultérieures. Vu l'Hypothèse 3 (cfr. (37)), la définition de π_{ijt} (cfr. (5)), (14) et (15), le profit du secteur j de la région i à la période t peut se réécrire

$$\pi_{ijt} = \frac{[1 - \alpha_j - \beta_j]}{\alpha_j} p_{at} k_{ijt} \quad (40)$$

Il en découle que

$$\frac{\pi'_{ijt}}{\pi_{ijt}} = \frac{k'_{ijt}}{k_{ijt}}$$

Compte tenu de (18), on peut alors écrire

$$\frac{\pi'_{ij1}}{\pi_{ij1}} = \frac{k'_{ij1}}{k_{ij1}} = \frac{k_{ij0}^{\varepsilon_j} [q_1 + \tau_1]^{-\frac{\beta_j}{1-\alpha_j-\beta_j}}}{k_{ij0}^{\varepsilon_j} q_1^{-\frac{\beta_j}{1-\alpha_j-\beta_j}}} = \left[\frac{q_1}{q_1 + \tau_1} \right]^{\frac{\beta_j}{1-\alpha_j-\beta_j}} \quad (41)$$

$$\frac{\pi'_{ij2}}{\pi_{ij2}} = \frac{k'_{ij2}}{k_{ij2}} = \frac{k_{ij1}^{\varepsilon_j} [q_2 + \tau_2]^{-\frac{\beta_j}{1-\alpha_j-\beta_j}}}{k_{ij1}^{\varepsilon_j} q_2^{-\frac{\beta_j}{1-\alpha_j-\beta_j}}} = \left[\left[\frac{q_1}{q_1 + \tau_1} \right]^{\varepsilon_j} \frac{q_2}{q_2 + \tau_2} \right]^{\frac{\beta_j}{1-\alpha_j-\beta_j}} \quad (42)$$

Vu les hypothèses sur les paramètres ($0 < \alpha_j, \beta_j < \alpha_j + \beta_j < 1$ et $0 < \varepsilon_j$), ces expressions montrent que les profits courants sont inversement proportionnels aux prix des permis. On distingue un effet direct qui joue pour les deux périodes : le prix des permis τ_t augmente le coût total de l'énergie, et donc diminue le profit de la même période. On distingue aussi un effet indirect qui ne joue qu'en $t = 2$: le renchérissement de l'énergie en $t = 1$ diminue l'investissement des firmes et donc le stock de capital total du secteur en $t = 1$, ce qui affecte négativement la productivité des facteurs en $t = 2$ (cfr. (16)), et donc diminue les profits en $t = 2$. Ce deuxième effet est lié à l'hypothèse de croissance endogène, et serait absent dans un contexte de progrès technique exogène (par exemple sous l'hypothèse (32)).

De ce qui précède, il découle que :

Proposition 0 : Les profits sectoriels sont affectés de la même façon selon la région, au sens où

$$\frac{\pi'_{vjt}}{\pi_{vjt}} = \frac{\pi'_{wjt}}{\pi_{wjt}} < 1, \quad j = a, b \text{ et } t = 1, 2 \quad (43)$$

Les deux effets identifiés ci-dessus (et en particulier le deuxième) se réduisent à des fonctions des rapports des coûts de l'énergie caractérisant les deux scénarios, rapports qui dépendent de la technologie et du contexte international qui sont communs au deux régions.

En toute généralité, il n'est pas possible d'affirmer que la somme des profits actualisés d'un secteur diminuera plus que celle de l'autre. Cependant, étant donné les Hypothèses 1 et 4 (cfr. (33) et (38)), on a, au niveau des profits sectoriels courants, le résultat suivant :

Proposition 1 : Le profit courant du secteur le plus intensif en énergie est plus affecté que celui de l'autre secteur, au sens où

$$\frac{\pi'_{iat}}{\pi_{iat}} < \frac{\pi'_{ibt}}{\pi_{ibt}} < 1, \quad i = v, w \text{ et } t = 1, 2 \quad (44)$$

En toute généralité, le rapport des profits d'un secteur d'une région obtenus sous les deux scénarios peut évoluer au cours du temps à la hausse ou à la baisse. Cependant, sous l'Hypothèse 5 (cfr. (39)) qui stipule que les rendements d'échelle globaux sont croissants, on obtient immédiatement la proposition suivante :

Proposition 2 : Les profits du secteur j sont plus affectés par la politique environnementale à la période 2 qu'à la période 1, au sens où

$$\frac{\pi'_{ij2}}{\pi_{ij2}} < \frac{\pi'_{ij1}}{\pi_{ij1}} < 1, \quad i = v, w \text{ et } j = a, b \quad (45)$$

6 Impacts sur les profits totaux actualisés sectoriels

Les profits totaux actualisés du secteur j sont définis par (4). A l'optimum, étant donné (40), ceux-ci se réécrivent :

$$\Pi_{ij} = \sum_{t=1,2} \frac{\pi_{ijt}}{[1+r]^{t-1}} = \frac{1 - \alpha_j - \beta_j}{\alpha_j} \sum_{t=1,2} \frac{p_{at} k_{ijt}}{[1+r]^{t-1}} \quad (46)$$

L'impact de la politique environnementale sur les profits totaux actualisés du secteur j se mesure par le rapport

$$\frac{\Pi'_{ij}}{\Pi_{ij}} = \frac{\pi_{ij1}}{\Pi_{ij}} \frac{\pi'_{ij1}}{\pi_{ij1}} + \left[1 - \frac{\pi_{ij1}}{\Pi_{ij}}\right] \frac{\pi'_{ij2}}{\pi_{ij2}} \quad (47)$$

En vertu de la Proposition 1, on pourrait s'attendre à ce que la perte de revenu soit plus élevée pour le secteur a :

$$\Pi'_{ia}/\Pi_{ia} < \Pi'_{ib}/\Pi_{ib} (< 1) \quad (48)$$

Ce résultat serait conforme à l'intuition puisque le secteur a est plus intensif en énergie que le secteur b ¹⁴. Cherchons à préciser ce que suppose ce résultat, toujours dans le cadre des Hypothèses 1 à 5.

La Proposition 0 dit que les rapports π'_{ijt}/π_{ijt} ne dépendent pas de i . Pour alléger les écritures, posons $x_{jt} = \pi'_{ijt}/\pi_{ijt}$ et $\varphi_{ij} = \pi_{ij1}/\Pi_{ij}$. Alors (48) suppose que

$$\varphi_{ia}x_{a1} + [1 - \varphi_{ia}]x_{a2} < \varphi_{ib}x_{b1} + [1 - \varphi_{ib}]x_{b2}$$

ce qui implique (compte tenu de la Proposition 2 qui stipule que $x_{j2} < x_{j1} < 1$, $j = a, b$) :

$$D(\varphi_{ia}) = \frac{\varphi_{ia} [x_{a1} - x_{a2}]}{x_{b1} - x_{b2}} - \frac{x_{b2} - x_{a2}}{x_{b1} - x_{b2}} < \varphi_{ib} \quad (49)$$

Le membre de gauche de cette inégalité définit $D(\varphi_{ia})$, une droite croissant en fonction de φ_{ia} . Seules sont admissibles les valeurs de φ_{ia} et φ_{ib} comprises entre 0 et 1. La Figure 3 décrit les différentes situations possibles.

Considérons d'abord le quadrant supérieur droit. $D(0) < 0$ implique qu'il est impossible que la droite D passe au dessus du carré défini par $0 \leq \varphi_{ia}, \varphi_{ib} \leq 1$. Il demeure deux cas possibles :

Cas 1 : D passe en dessous du carré : alors $D(1) \leq 0 \Rightarrow x_{a1} - x_{a2} - [x_{b2} - x_{a2}] \leq 0 \Rightarrow x_{a1} \leq x_{b2}$. Dans ce cas, (49) est vraie $\forall \varphi_{ia}, \varphi_{ib} \in [0, 1]$.

Cas 2 : D traverse le carré : alors D coupe l'axe des abscisses en $\bar{\varphi}_{ia} \equiv D(\varphi_{ia}) = 0 \Rightarrow \bar{\varphi}_a = \frac{x_{b2} - x_{a2}}{x_{b1} - x_{b2}}$. Alors, de deux choses l'une :

- (a) soit $\varphi_{ia} < \bar{\varphi}_a$, et alors (49) est vraie $\forall \varphi_{ib} \in [0, 1]$;
- (b) soit $\bar{\varphi}_a \leq \varphi_{ia}$, alors (49) est vraie si $\varphi_{ib} > D(\varphi_{ia})$.

¹⁴C'est en effet ce qu'observent Bréchet, Germain et Monfort (2004) dans un contexte statique.

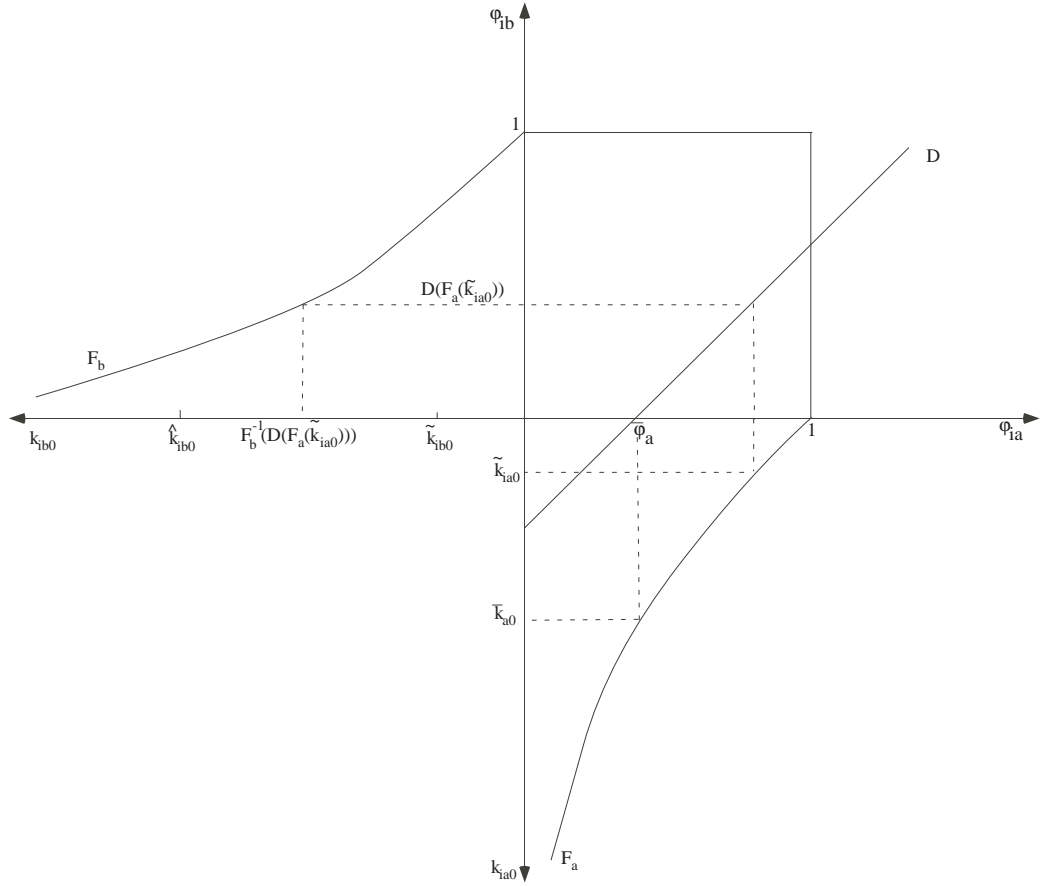


Figure 3:

Or, étant donné (40) et (46),

$$\begin{aligned}
 \varphi_{ij} &= \frac{\pi_{ij1}}{\Pi_{ij}} = \frac{p_{a1}k_{ij1}}{p_{a1}k_{ij1} + \frac{1}{1+r}p_{a2}k_{ij2}} \\
 &= \frac{1}{1 + \frac{1+\phi_a}{1+r}g_{ij2}} = \frac{1}{1 + \frac{1+\phi_a}{1+r}\xi_{j2}\xi_{j1}^{\varepsilon-1}k_{ij0}^{\varepsilon(\varepsilon-1)}} \equiv F_j(k_{ij0}) \quad (50)
 \end{aligned}$$

où on a fait usage de (24) et où $\phi_a = \frac{p_{a2}}{p_{a1}} - 1$. F_j ($j = a, b$) sont des fonctions monotones décroissantes inversibles des dotations initiales de capital correspondantes. Ceteris paribus, (50) montre que plus la dotation initiale de capital d'un secteur est élevée, plus sa croissance sera élevée et plus la part de ses profits en $t = 1$ dans ses profits totaux actualisés sera faible. Les deux cas distingués ci-dessus peuvent donc être recharacterisés comme suit :

Cas 1 : $x_{a1} \leq x_{b2}$, alors (49) est vraie $\forall k_{ia0}, k_{ib0} > 0$.

Cas 2 : $x_{a1} > x_{b2}$, alors, de deux choses l'une :

- (a) soit $\bar{k}_{a0} < k_{ia0}$, et alors (49) est vraie $\forall k_{ib0} > 0$;
- (b) soit $\bar{k}_{a0} \geq k_{ia0}$, et alors (49) est vraie si $k_{ib0} < F_b^{-1}(D(F_a(k_{ia0})))$, où par définition : $\bar{k}_{a0} = F_a^{-1}(\bar{\varphi}_a) = F_a^{-1}(\frac{x_{b2}-x_{a2}}{x_{b1}-x_{b2}})$.

Le couple $(\tilde{k}_{ia0}, \tilde{k}_{ib0})$ de la Figure 3 illustre un exemple où (49) est vraie dans le cas 2(b).

Nous définissons par *paradoxe au niveau sectoriel* la situation où l'inégalité (48) (ou (49)) est violée, c-à-d où le secteur intensif en énergie est *moins* affecté par la politique environnementale que l'autre secteur. Pour observer un tel résultat, il faut donc que trois conditions soient remplies : (i) $x_{a1} > x_{b2}$; (ii) $\bar{\varphi}_a \leq \varphi_{ia}$ et (iii) $\varphi_{ib} < D(\varphi_{ia})$. Essayons de les interpréter.

La première condition

$$C1 : x_{b2} < x_{a1} \quad (51)$$

suppose que la baisse du profit courant du secteur b en $t = 2$ soit supérieure à celle du secteur a en $t = 1$ ¹⁵. Etant donné (41) et (42), on montre aisément que C1 se ramène à

$$\left[\frac{q_1 + \tau_1}{q_1} \right]^{\frac{\beta_a}{\beta_b} - \varepsilon} < \frac{q_2 + \tau_2}{q_2}$$

Cette inégalité est vraie $\forall \tau_2 > 0$ si $\frac{\beta_a}{\beta_b} - \varepsilon \leq 0$. Si au contraire le rapport des intensités sectorielles est tel que $\frac{\beta_a}{\beta_b} - \varepsilon > 0$, alors C1 suppose un accroissement minimal du coût de l'énergie en $t = 2$, l'accroissement du coût de l'énergie en première période étant donné.

La deuxième condition impose une borne minimale à la part des profits en $t = 1$ dans les profits totaux actualisés du secteur a , φ_{ia} :

$$C2 : \varphi_{ia} > \frac{x_{b2} - x_{a2}}{x_{a1} - x_{a2}} \Leftrightarrow k_{ia0} < F_a^{-1}\left(\frac{x_{b2} - x_{a2}}{x_{b1} - x_{b2}}\right) \quad (52)$$

Etant donnés les évolutions de prix des investissements ϕ_a , de l'énergie et des permis (qui définissent univoquement les x_{jt} , $j = a, b$, $t = 1, 2$ via (41) et (42)), C2 impose une borne maximale à la dotation initiale de capital du secteur a .

Enfin, la troisième condition pour observer le paradoxe au niveau sectoriel suppose que

$$C3 : D(\varphi_{ia}) > \varphi_{ib} \Leftrightarrow k_{ib0} > F_b^{-1}(D(F_a(k_{ia0}))) \quad (53)$$

¹⁵Si C1 n'est pas satisfaite, alors on montre aisément que $\Pi'_{ia}/\Pi_{ia} < \Pi'_{ib}/\Pi_{ib}$, car alors Π'_{ia}/Π_{ia} est une moyenne pondérée de deux valeurs toutes deux plus petites que les valeurs dont Π'_{ib}/Π_{ib} est la moyenne pondérée.

Etant donnés (i) les évolutions de prix des investissements (ϕ_a), de l'énergie et des permis et (ii) la dotation initiale de capital du secteur a (qui détermine φ_{ia}), la condition C3 impose donc une borne minimale à la dotation initiale de capital du secteur b .

Le couple $(\tilde{k}_{ia0}, \hat{k}_{ib0})$ de la Figure 3 illustre un exemple où les conditions C1 à C3 caractérisant le paradoxe au niveau sectoriel sont remplies.

En résumé, sous les Hypothèses 1 à 5, les impacts de la politique environnementale seront plus marqués pour le secteur intensif en énergie a (au sens de (48)), à moins que les conditions C1 à C3 ne soient satisfaites. Celles-ci supposent que l'impact de la politique environnementale sur le secteur b en $t = 2$ soit supérieur à celui sur le secteur a en $t = 1$ (ce qui n'implique pas nécessairement que τ_2 soit supérieur à τ_1) et que le poids des profits de deuxième période dans les profits totaux actualisés du secteur b soit suffisamment important (ce qui suppose que la croissance du secteur b soit suffisamment forte) et inversement pour le secteur a . Ce poids supérieur des profits en $t = 2$ pour le secteur b explique que celui-ci subit relativement plus l'impact de la politique environnementale en deuxième période que l'autre secteur. C'est cette différence de poids des profits courants dans les profits totaux actualisés qui explique la possibilité du paradoxe sectoriel identifié ci-dessus, alors qu'en terme d'impact sur les profits courants, le secteur le plus intensif en énergie est toujours plus affecté que l'autre par la politique environnementale (en vertu de la Proposition 1).

7 Impacts sur les revenus régionaux

Cette section est consacrée à la comparaison des impacts de la politique environnementale sur les revenus engendrés au sein des régions. Ceux-ci s'écrivent pour la région i comme suit :

$$\Pi_i = \sum_{j=a,b} \Pi_{ia} = \sum_{j=a,b} \sum_{t=1,2} \pi_{ijt} \quad (54)$$

où Π_{ij} et π_{ijt} sont respectivement définis par (46)) et (5)). Π_i est constitué de l'ensemble des revenus générés par l'appareil de production de la région i après paiement des facteurs énergie et capital, pour être ensuite versés aux ménages de la région (cfr. les tableaux des flux macroéconomiques de la section 1). Π_i mesure donc les revenus totaux actualisés des ménages de la région i , compte *non* tenu de la dotation de permis reçue par cette région¹⁶.

L'impact de la politique environnementale sur le revenu régional peut s'écrire comme une moyenne pondérée des effets de cette politique sur chacun des deux

¹⁶Dans cette section, on ne prend donc pas en considération les dotations de permis reçues par les régions.

secteurs

$$\frac{\Pi'_i}{\Pi_i} = \frac{\Pi'_{ia}}{\Pi_{ia}} \frac{\Pi_{ia}}{\Pi_i} + \frac{\Pi'_{ib}}{\Pi_{ib}} \left[1 - \frac{\Pi_{ia}}{\Pi_i} \right] \quad (55)$$

A priori, on peut s'attendre à ce que la perte de revenu induite par la politique environnementale soit plus élevée pour la région w au sens où :

$$\Pi'_w/\Pi_w < \Pi'_v/\Pi_v (< 1) \quad (56)$$

Ce résultat serait conforme à l'intuition puisque w est initialement la mieux pourvue en capital du secteur a , le secteur le plus intensif en énergie¹⁷. Cependant, étant donné la possibilité du paradoxe au niveau sectoriel identifié à la section précédente, à savoir que le secteur b puisse être plus atteint par la politique environnementale que le secteur a , il semble possible que ce paradoxe puisse s'étendre au niveau inter-régional, à savoir que les revenus de la région w diminuent *moins* que ceux de la région v .

Déterminer les conditions générales garantissant (56) serait complexe et dépasserait les ambitions de la présente note. Notre intention se limitera par la suite à montrer que la région w peut être *moins* affectée que la région v , *même en l'absence* du paradoxe au niveau sectoriel. Ce cas de figure, que l'on qualifie par la suite de *paradoxe au niveau régional*, correspond à la situation où l'inégalité suivante est vérifiée :

$$\frac{\Pi'_v}{\Pi_v} = \frac{\Pi'_{va}}{\Pi_{va}} \frac{\Pi_{va}}{\Pi_v} + \frac{\Pi'_{vb}}{\Pi_{vb}} \left[1 - \frac{\Pi_{va}}{\Pi_v} \right] < \frac{\Pi'_{wa}}{\Pi_{wa}} \frac{\Pi_{wa}}{\Pi_w} + \frac{\Pi'_{wb}}{\Pi_{wb}} \left[1 - \frac{\Pi_{wa}}{\Pi_w} \right] = \frac{\Pi'_w}{\Pi_w} (< 1) \quad (57)$$

Deux conditions suffisantes garantissant cette inégalité sont les suivantes :

$$\text{D1} \quad : \quad \Pi'_{vb}/\Pi_{vb} < \Pi'_{wa}/\Pi_{wa} \quad (58)$$

$$\text{D2} \quad : \quad \Pi'_{ia}/\Pi_{ia} < \Pi'_{ib}/\Pi_{ib}, \quad i = v, w \quad (59)$$

D1 suppose que l'impact de la politique environnementale sur le secteur b de la région v est plus important que celui sur le secteur a de région w . D2 stipule que la politique environnementale atteint plus le secteur a que le secteur b (au niveau sectoriel, la situation "normale" prévaut donc dans les deux régions).

Ces deux conditions peuvent se réécrire comme suit :

$$\Pi'_{va}/\Pi_{va} < \Pi'_{vb}/\Pi_{vb} < \Pi'_{wa}/\Pi_{wa} < \Pi'_{wb}/\Pi_{wb} \quad (60)$$

Elles garantissent (57) car elles impliquent que Π'_v/Π_v est une moyenne pondérée de deux valeurs toutes deux inférieures aux deux valeurs dont Π'_w/Π_w est la moyenne pondérée.

¹⁷C'est en effet le résultat obtenu par Bréchet, Germain et Monfort (2004) dans un contexte statique.

Voyons maintenant ce qu'impliquent ces conditions au niveau des exogènes du modèle, en particulier au niveau des dotations initiales de capital par secteur et par région :

- D1 : Vu (47)¹⁸, $\Pi'_{vb}/\Pi_{vb} < \Pi'_{wa}/\Pi_{wa} \Rightarrow$

$$\varphi_{vb}x_{b1} + [1 - \varphi_{vb}]x_{b2} < \varphi_{wa}x_{a1} + [1 - \varphi_{wa}]x_{a2} \quad (61)$$

Etant donné la Proposition 1 qui impose que $x_{a1} < x_{b1}$ et $x_{a2} < x_{b2}$, l'inégalité précédente n'est possible que si $x_{b2} < x_{a1}$. On se trouve donc dans le cas 2 décrit à la section précédente. Compte tenu de (49), (61) peut se réécrire

$$\varphi_{vb} < D(\varphi_{wa}) = \frac{\varphi_{wa}[x_{a1} - x_{a2}]}{x_{b1} - x_{b2}} - \frac{x_{b2} - x_{a2}}{x_{b1} - x_{b2}} \quad (62)$$

Comme $0 \leq \varphi_{vb} \leq 1$, cette inégalité ne peut être satisfaite que si $D(\varphi_{wa})$ est positif, ce qui implique que $\varphi_{wa} \geq \bar{\varphi}_a$ (cfr. la Figure 4 ci-dessous).

- D2 : Comme D1 impose l'inégalité $x_{b2} < x_{a1}$ et que celle-ci ne dépend pas de i , elle doit aussi s'appliquer aux deux inégalités de D2. En outre, D1 impose pour la région w que $\varphi_{wa} \geq \bar{\varphi}_a$. Dans ce cas et comme on l'a vu à la section précédente, $\Pi'_{wa}/\Pi_{wa} < \Pi'_{wb}/\Pi_{wb}$ implique que $\varphi_{wb} > D(\varphi_{wa})$. Du côté de la région v , si $\varphi_{va} < \bar{\varphi}_a$, alors $\Pi'_{va}/\Pi_{va} < \Pi'_{vb}/\Pi_{vb}$ est satisfait $\forall \varphi_{vb} \in [0, 1]$, et donc en particulier pour φ_{vb} satisfaisant (62).

La Figure 4 illustre une configuration des parts de profits φ_{ij} ($i = v, w; j = a, b$) qui vérifie D1 et D2, plus précisément telle que $\varphi_{wa} > \bar{\varphi}_a > \varphi_{va}$ et $\varphi_{wb} > D(\varphi_{wa}) > \varphi_{vb}$. Etant donné (50), ces inégalités peuvent se réexprimer en termes de dotations initiales de capital, ce qui donne : $k_{wa0} < \bar{k}_{a0} = F_a^{-1}(\bar{\varphi}_a) = F_a^{-1}(\frac{x_{b2} - x_{a2}}{x_{b1} - x_{b2}}) < k_{va0}$ et $k_{wb0} < F_b^{-1}(D(F_a(k_{wa0}))) < k_{vb0}$.

Une telle configuration est-elle compatible avec l'hypothèse que la région w est initialement plus spécialisée que l'autre région dans la production de biens a ? Cette hypothèse suppose que $\sigma_0 = \frac{k_{wa0}}{k_{va0}} \frac{k_{wb0}}{k_{vb0}} > 1$. Si D1 et D2 imposent que la première fraction du membre de gauche soit inférieure à 1 et que la deuxième soit supérieure à 1, il ressort du paragraphe précédent que ces conditions n'imposent pas de borne supérieure à k_{va0} , qui peut donc toujours être "choisi" de façon à ce que $\sigma_0 > 1$. La configuration décrite par la Figure 4 décrit donc bien le paradoxe au niveau régional puisque la région w est *moins* affectée que la région v , alors que w est initialement la mieux pourvue en capital du secteur a , le secteur le plus intensif en énergie.

Rappelons que :

¹⁸Et en se rappelant que $x_{jt} = \pi'_{ijt}/\pi_{ijt}$ et $\varphi_{ij} = \pi_{ij1}/\pi_{ij}$.

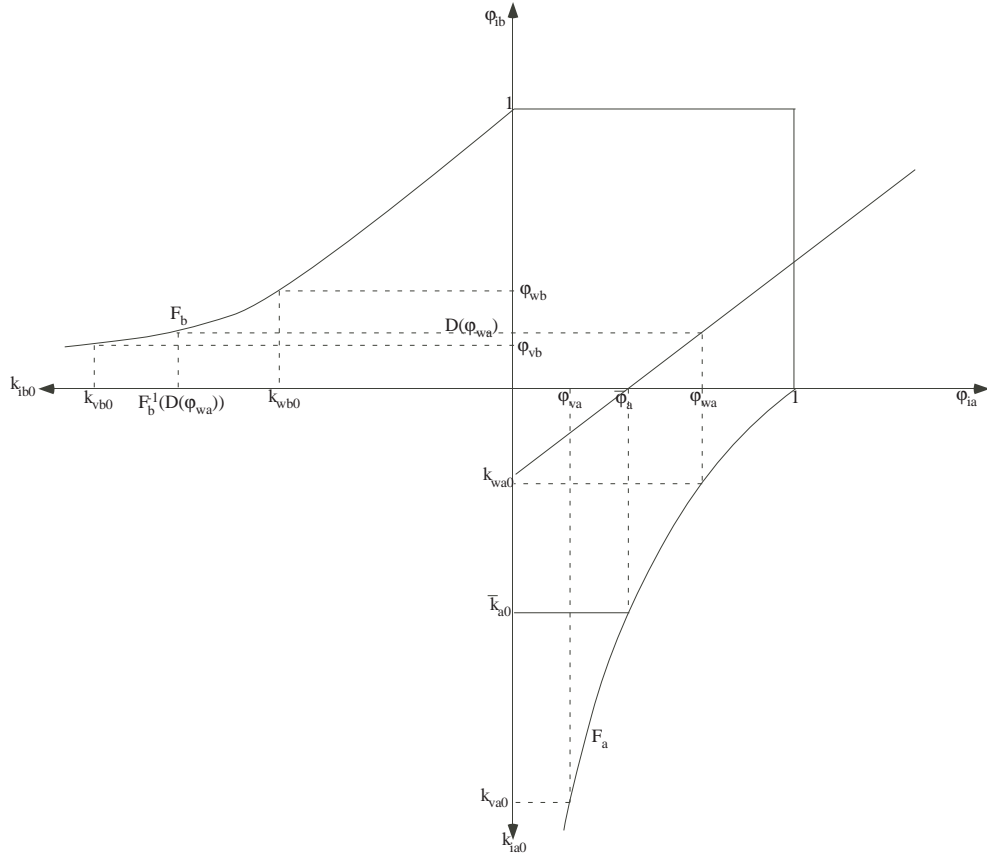


Figure 4:

- D1 et D2 sont suffisantes et non nécessaires pour obtenir le paradoxe au niveau régional;
- le paradoxe au niveau régional a été obtenu en l'absence de paradoxe au niveau sectoriel (le secteur a est plus affecté que b par la politique environnementale dans les deux régions);
- il n'y a pas de retournement de spécialisation. Au contraire, comme déjà observé à la section 4, sous les Hypothèses 1 à 5, l'indice de divergence de spécialisation va croissant.

L'explication à la base du paradoxe au niveau régional est liée au fait que bien que partageant la même technologie et confrontés aux mêmes prix, les secteurs de la région v sont plus affectés par la politique environnementale que

ceux de la région w . L'expression (60) implique en effet que

$$\Pi'_{vj}/\Pi_{vj} < \Pi'_{wj}/\Pi_{wj}, \quad j = a, b \quad (63)$$

Vu (47), ces inégalités reviennent à $\varphi_{vj}x_{j1} + [1 - \varphi_{vj}]x_{j2} < \varphi_{wj}x_{j1} + [1 - \varphi_{wj}]x_{j2}$ ($j = a, b$) qui, en vertu de la Proposition 2, se simplifient et deviennent $\varphi_{vj} < \varphi_{wj}$ ($j = a, b$). Etant donné (50), ces dernières inégalités conduisent à $k_{wa0} < k_{va0}$ et $k_{wb0} < k_{vb0}$. Etant donné que les profits courants sont plus affectés en $t = 2$ qu'en $t = 1$, les profits totaux actualisés d'un secteur seront d'autant plus réduits par la politique environnementale que la part des profits courants en $t = 2$ est élevée. Or cette part dépend positivement de la croissance du secteur, qui est elle-même une fonction positive de sa dotation initiale de capital. Le paradoxe au niveau régional décrit ci-dessus s'explique donc notablement par le fait que les secteurs de la région v sont initialement mieux pourvus en capital que leurs correspondants dans la région w ¹⁹.

8 Impacts sur les revenus par période

L'intention est maintenant de comparer les impacts de la politique environnementale sur les revenus totaux des ménages en $t = 1$ et $t = 2$. A la différence des deux sections précédentes, où seuls étaient considérés les profits engendrés par les entreprises, nous prendrons également en compte les dotations de permis. Si ces dernières sont attribuées directement aux ménages, le revenu des ménages à la période t s'écrit²⁰ :

$$R_{it} = \pi_{iat} + \pi_{ibt} + \tau_t \bar{e}_{it} = \Pi_{it} + \tau_t \bar{e}_{it} \quad (64)$$

où Π_{it} regroupe par définition les profits issus des entreprises de la région i à la période t . L'impact de la politique environnementale sur le revenu en t peut se mesurer par le rapport R'_{it}/R_{it} . Ce rapport s'écrit

$$\frac{R'_{it}}{R_{it}} = \frac{\Pi'_{it} + \tau_t \bar{e}_{it}}{\Pi_{it}} \quad (65)$$

puisque le scénario BAU suppose que $R_{it} = \Pi_{it}$.

Considérons d'abord l'impact sur les revenus provenant des firmes, c-à-d le rapport Π'_{it}/Π_{it} . Celui-ci se décompose comme suit :

$$\frac{\Pi'_{it}}{\Pi_{it}} = \frac{\pi_{iat}}{\Pi_{it}} \frac{\pi'_{iat}}{\pi_{iat}} + \left[1 - \frac{\pi_{iat}}{\Pi_{it}} \right] \frac{\pi'_{ibt}}{\pi_{ibt}} \quad (66)$$

En vertu de la Proposition 2, on pourrait s'attendre à ce que la perte de revenu soit plus élevée en période 2 :

$$\Pi'_{i2}/\Pi_{i2} < \Pi'_{i1}/\Pi_{i1} (< 1) \quad (67)$$

¹⁹Notablement mais pas entièrement, car (63) ne suffit pas pour engendrer ce paradoxe. En revanche, ensembles, (63) et la condition D1 suffisent.

²⁰Cfr. les tableaux des flux macroéconomiques de la section 1.

Ce résultat serait en effet conforme à l'intuition puisque les deux secteurs sont plus affectés en deuxième période. A l'annexe C, on montre qu'il en va bien ainsi et que l'inégalité inverse n'est pas possible.

Même si l'inégalité (67) est vérifiée, il n'est pas sûr qu'il en sera de même après prise en compte des dotations de permis. Celles-ci pourraient même être calculées de façon à égaliser les impacts sur les différentes périodes de la vie des agents, c-à-d de façon à vérifier que $R'_{i2}/R_{i2} = R'_{i1}/R_{i1}$. Cependant, il est certaines règles de calcul des dotations qui permettent d'évaluer l'impact de la politique environnementale sur les revenus totaux des ménages.

Il en va par exemple ainsi de la règle qui prévoit des dotations de permis proportionnelles aux émissions BAU à chaque période, selon la formule suivante :

$$\bar{e}_{it} = K e_{it}, \quad 0 < K < 1 \quad (68)$$

Vu (65) et (68), le calcul de R'_{it}/R_{it} suppose d'évaluer

$$\begin{aligned} \frac{q_t e_{it}}{\Pi_{it}} &= \frac{q_t [e_{iat} + e_{ibt}]}{\Pi_{it}} = \frac{q_t e_{iat}}{\pi_{iat}} \frac{\pi_{iat}}{\Pi_{it}} + \frac{q_t e_{ibt}}{\pi_{ibt}} \frac{\pi_{ibt}}{\Pi_{it}} \\ &= \frac{\beta_a}{\varepsilon} \psi_{it} + \frac{\beta_b}{\varepsilon} [1 - \psi_{it}] \end{aligned}$$

en vertu de (10) et (40) (avec $\tilde{q}_t = q_t$ et $\tilde{p}_{it} = p_{at}$). Vu l'Hypothèse 1 sur les intensités énergétiques, il en découle immédiatement que $\frac{q_1 e_{i1}}{\Pi_{i1}} > \frac{q_2 e_{i2}}{\Pi_{i2}}$ suppose que $\psi_{i1} > \psi_{i2}$. ψ_{it} étant proportionnel à $\chi_{it} = k_{iat}/k_{ibt}$, l'inégalité précédente revient à $k_{ia1}/k_{ib1} > k_{ia2}/k_{ib2} \Rightarrow k_{ia2}/k_{ia1} > k_{ib2}/k_{ib1} \Rightarrow g_{ib2} > g_{ia2}$. Etant donné (24), cette dernière inégalité est établie si $\xi_{b2} \xi_{b1}^{\varepsilon-1} k_{ib0}^{\varepsilon(\varepsilon-1)} > \xi_{a2} \xi_{a1}^{\varepsilon-1} k_{ia0}^{\varepsilon(\varepsilon-1)} \Leftrightarrow \chi_{i0} < \left[\frac{\xi_{b2} \xi_{b1}^{\varepsilon-1}}{\xi_{a2} \xi_{a1}^{\varepsilon-1}} \right]^{\frac{1}{\varepsilon(\varepsilon-1)}}$, autrement dit si l'indice de spécialisation de la région i est initialement suffisamment faible. S'il en est bien ainsi, on a

$$\frac{q_1 e_{i1}}{\Pi_{i1}} > \frac{q_2 e_{i2}}{\Pi_{i2}} \quad (69)$$

Comme (65) peut se réécrire

$$\frac{R'_{it}}{R_{it}} = \frac{\Pi'_{it}}{\Pi_{it}} + K \frac{\tau_t}{q_t} \frac{q_t e_{it}}{\Pi_{it}} \quad (70)$$

il découle de (67) et (69) que les revenus futurs des ménages diminuent relativement plus que leurs revenus présents, au sens où

$$\frac{R'_{i2}}{R_{i2}} < \frac{R'_{i1}}{R_{i1}} (< 1) \quad (71)$$

En résumé, on a montré dans la présente section que (i) les revenus des ménages provenant des deux secteurs sont plus affectés en $t = 2$ qu'en $t = 1$ (au sens de (67)) et que (ii) il en allait de même des revenus totaux des ménages, c-à-d dotations de permis comprises, dans le cas où celles-ci sont proportionnelles aux émissions BAU à chaque période.

Conclusion

Le but de cette contribution a été d'analyser, au moyen d'un modèle à la Heckscher-Ohlin à deux périodes, les impacts d'une politique de réduction des émissions dans le cadre d'une petite économie ouverte, bi-régionale et bi-sectorielle, où les régions se caractérisent par une spécialisation différente en termes de production de biens et services. L'un des deux secteurs produit des biens plus intensifs en énergie (et donc en émissions polluantes), et l'une des deux régions est plus spécialisée dans la production de ce type de biens. Le modèle est à croissance endogène, au sens où l'accumulation du capital est à rendements croissants, la productivité totale des facteurs au niveau de la firme étant une fonction croissante du capital *total* accumulé dans le secteur régional auquel elle appartient. La politique environnementale consiste à obliger à chaque période les firmes polluantes à détenir des permis en fonction de leurs émissions, permis qui peuvent être échangés sur un marché international à chaque période.

Au départ de deux hypothèses précisant que les rendements d'échelle privés et globaux sont identiques entre secteurs et que ces derniers sont croissants, l'analyse de la politique environnementale fait ressortir les résultats suivants. Au niveau des profits sectoriels *courants* (c-à-d d'une période donnée), la politique se traduit par des diminutions relatives plus marquées (i) à long terme qu'à court terme (pour les deux secteurs), ainsi que (ii) pour le secteur le plus intensif en énergie (à chaque période). En revanche, l'impact sur les profits sectoriels courants est à chaque période identique dans les deux régions.

Ce dernier résultat n'implique pas qu'il en va de même pour les profits totaux *actualisés* sectoriels. L'impact de la politique environnementale sur les profits totaux actualisés des secteurs dépend crucialement de leurs croissances respectives, celles-ci étant elles-même déterminées par leurs dotations *initiales* de capital. On ne peut exclure que le secteur le plus intensif en énergie soit *moins* affecté par la politique environnementale que l'autre secteur. Ce cas de figure, que l'on a qualifié de *paradoxe au niveau sectoriel*, se produit (i) quand la politique environnementale se traduit par une perte de profit courant du secteur moins intensif en énergie en deuxième période supérieure à celle de l'autre secteur en première période (ce qui n'implique pas nécessairement que le prix des permis soit croissant) et (ii) pour un taux de croissance du secteur moins intensif en énergie suffisamment grand (et inversement pour l'autre secteur).

L'analyse s'est poursuivie par la comparaison des effets de la politique de réduction des émissions sur les revenus régionaux, définis comme la somme des profits totaux actualisés des secteurs qui y sont établis. Comme au niveau sectoriel, tous les cas de figures sont possibles. Aussi s'est-on concentré sur le cas (a priori moins intuitif) où la région la plus spécialisée dans la production de biens intensifs en énergie (la région *v*) est *moins* affectée par la politique environnementale que l'autre région (la région *w*) en termes de perte de revenus. Cette situation, que l'on a qualifiée de *paradoxe au niveau régional*, est due

notablement au fait que, bien que partageant la même technologie et confrontés aux mêmes prix, les profits des secteurs de la région v diminuent plus suite à la politique environnementale que ceux des secteurs de la région w . Cette différence d'impacts est induite par une croissance plus élevée des secteurs de la région v , ce différentiel de croissance s'expliquant à son tour par le fait que les secteurs de la région v sont initialement mieux pourvus en capital que leurs correspondants de la région w . Une croissance plus élevée se traduit en effet par une part des profits courants de deuxième période dans les profits totaux actualisés plus élevée. Or c'est en deuxième période que les profits courants sont le plus atteints par la politique environnementale.

Il importe de souligner que le paradoxe au niveau régional a été obtenu en l'absence de paradoxe au niveau sectoriel (le secteur intensif en énergie est plus affecté que l'autre secteur par la politique environnementale dans les deux régions) et sans qu'il y ait eu de retournement de spécialisation au cours du temps (la région w demeure plus spécialisée dans la production du bien intensif en énergie et la divergence de spécialisation entre régions va même croissant).

Enfin, l'analyse des impacts de la politique environnementale sur les revenus à court et à long termes (c-à-d en première et en deuxième période) a montré que la baisse des revenus engendrés par les entreprises est plus forte à long terme. Il en va de même après prise en compte des dotations de permis reçues par les régions, dans le cas où les montants de ces dotations sont proportionnels aux émissions caractérisant la situation de laissez-faire (c-à-d en l'absence de politique).

Les résultats décrits ci-dessus ont été obtenus dans un contexte où tous les prix sont exogènes et où les deux régions correspondent en fait à deux petites économies ouvertes sur le Reste du Monde tout en étant indépendantes l'une de l'autre. Il serait intéressant d'évaluer la validité de ces résultats dans un cadre où la dimension nationale serait présente à côté de la dimension régionale (par exemple en supposant un marché national du travail dont le prix serait endogène). Ce faisant, une autre extension possible consisterait à supposer que le travail (ou un autre input) est spécifique au secteur d'activité. Le modèle serait alors à facteurs spécifiques et non plus à la Heckscher-Ohlin. Une autre façon de renforcer les interactions entre régions serait de postuler que le coefficient d'efficacité multipliant les fonctions de production dépend du capital total de l'économie (et non plus de secteur et de la région).

Bibliographie

Antweiler A., B. Copeland et M. S. Taylor (2001). "Is free trade good for the environment ?", *The American Economic Review*, 91, 877-908.

Batabyal A. et H. Beladi (Eds.) (2001). *The economics of international trade and the environment*, Lewis Publishers.

Bréchet T., M. Germain et P. Monfort (2004). "Allocation des efforts de dépollution dans des économies avec spécialisation internationale", IRES discussion paper n°2003/19 (révisé en septembre 2004), UCL.

Chen Z. (1992). "Long-run equilibria in a dynamic Heckscher-Ohlin model", *Canadian Journal of Economics*, XXV, n°4.

Copeland B. et M.S. Taylor (1997). "The trade-induced degradation hypothesis", *Resource and Energy Economics*, 19(4), 321-344.

John, A. et R. Pecchenino (1994). "An overlapping generations model of growth and the environment", *The Economic Journal*, vol. 104, 1393-1410.

Lee D. M. et A. Batabyal (2002). "Dynamic environmental policy in developing countries with a dual economy", *International Review of Economics & Finance*, 11(2), 191-206.

Nolet J. et M. Blais (2002). Incidences de l'approche fédérale sur le secteur industriel, *Options Politiques/Policy Options*, Décembre 2002 - Janvier 2003, 40-44.

Romer P. (1986). "Increasing returns and long-run growth", *Journal of Political Economy*, Vol. 94, n°5.

Annexes

A. Variables et paramètres du modèle

- y_{ijt} : production du secteur j de la région i à la période t
- k_{ijt} : capital du secteur j de la région i à la période t
- e_{ijt} : consommation énergétique (ou pollution) du secteur j de la région i à la période t
- i_{ijt} : investissement du secteur j de la région i à la période t
- π_{ijt} : profit du secteur j de la région i à la période t
- Π_j : somme des profits actualisés du secteur j de la région i
- Π_{it} : somme des profits des secteurs a et b de la région i à la période t
- A_{ijt} : coefficient d'efficacité du secteur j de la région i à la date t
- $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$: paramètres de la fonction de production du secteur j
- δ_j : coefficient de dépréciation du capital du secteur j
- p_{jt} : prix du secteur j à la période t
- q_t : prix de l'énergie à la période t
- τ_t : prix des permis à la période t
- \bar{e}_{it} : dotation de permis reçue par l'Etat de la région i à la période t
- \bar{e}_{ijt} : dotation de permis transférée par l'Etat de la région i au secteur j à la période t
- r : taux d'actualisation

- c_{it} : consommation du ménage de la région i à la période t
- R_{it} : revenu du ménage de la région i à la période t
- B_{it}^m : épargne *cumulée* du ménage de la région i à la période t
- ρ : taux de préférence intertemporel
- z_{ijt} : importation *nette* de biens j de la région i à la période t
- B_{it}^e : créances *cumulées* du Reste du Monde à l'égard de la région i à la période t
- σ_t : indice de spécialisation relative de la région w par rapport à la région v à la date t
- g_{ijt} : indice de croissance du capital du secteur j de la région i au temps t
- χ_{it} : indice de spécialisation de la région i au temps t
- κ_{jt} : dotation relative en capital du secteur j de la région w au temps t

B. Construction des Figures 1 et 2

Les différentes courbes sont celles des lieux de points caractérisés ci-dessous en exprimant chaque fois κ_{b0} comme une fonction de κ_{a0} à partir de (30) et (31). Ces lieux de points sont :

$$\begin{aligned}
\sigma_1 &= \sigma_2 \equiv \kappa_{b0} = \kappa_{a0}^{\frac{\varepsilon_a(\varepsilon_a-1)}{\varepsilon_b(\varepsilon_b-1)}} \\
\sigma_0 &= \sigma_2 \equiv \kappa_{b0} = \kappa_{a0}^{\frac{\varepsilon_a^2-1}{\varepsilon_b^2-1}} \\
\sigma_0 &= \sigma_1 \equiv \kappa_{b0} = \kappa_{a0}^{\frac{\varepsilon_a-1}{\varepsilon_b-1}} \\
\sigma_1 &= 1 \equiv \kappa_{b0} = \kappa_{a0}^{\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_b}} \\
\sigma_2 &= 1 \equiv \kappa_{b0} = \kappa_{a0}^{\frac{\varepsilon_a^2}{\varepsilon_b^2}}
\end{aligned}$$

Toutes ces courbes passent par les points $(0,0)$ et $(1,1)$. La convexité d'une courbe est d'autant plus forte que l'exposant est élevé. Sous l'hypothèse que $\varepsilon_a > \varepsilon_b > 1$, on montre sans peine que, d'une part,

$$\frac{\varepsilon_a(\varepsilon_a-1)}{\varepsilon_b(\varepsilon_b-1)} > \frac{\varepsilon_a^2-1}{\varepsilon_b^2-1} > \frac{\varepsilon_a-1}{\varepsilon_b-1}$$

et que, d'autre part,

$$\frac{\varepsilon_a^2}{\varepsilon_b^2} > \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_b}$$

D'où les positions relatives des courbes illustrées par les Figures 1 et 2. La caractérisation des différentes zones en fonction de l'évolution de σ_t suit alors automatiquement.

C. Démonstration de (67)

Pour alléger les écritures, posons $\psi_{it} = \pi_{iat}/\Pi_{it}$. Par ailleurs, comme précédemment, $x_{jt} = \pi'_{ijt}/\pi_{ijt}$. On montre que la violation de (67) conduit à une contradiction. En effet, $\Pi'_{i2}/\Pi_{i2} > \Pi'_{i1}/\Pi_{i1}$ suppose que

$$\psi_{i2}x_{a2} + [1 - \psi_{i2}]x_{b2} > \psi_{i1}x_{a1} + [1 - \psi_{i1}]x_{b1}$$

ce qui implique (tenant compte de la Proposition 1) :

$$\psi_{i1}[x_{b1} - x_{a1}] + x_{b2} - x_{b1} > \psi_{i2}[x_{b2} - x_{a2}] \quad (72)$$

Or, étant donné (40) et la définition de Π_{it} ,

$$\psi_{it} = \frac{\pi_{iat}}{\Pi_{it}} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_a}{\alpha_b} \frac{1-\alpha_b-\beta_b}{1-\alpha_a-\beta_a} \frac{1}{\chi_{it}}} \quad (73)$$

où χ_{it} est l'indice de spécialisation de la région i (défini par (25)). Compte tenu de l'évolution de cet indice au cours du temps (cfr. (28) et (29)), (72) peut se réécrire :

$$\frac{1}{1 + \frac{\omega}{\frac{\xi_{a1}}{\xi_{b1}} \chi_{i0}^\varepsilon}} [x_{ib1} - x_{ia1}] + x_{ib2} - x_{ib1} > \frac{1}{1 + \frac{\omega}{\frac{\xi_{a2}}{\xi_{b2}} \left[\frac{\xi_{a1}}{\xi_{b1}} \right]^\varepsilon \chi_{i0}^{\varepsilon^2}}} [x_{ib2} - x_{ia2}] \quad (74)$$

où pour la commodité, on a posé $\omega = \frac{\alpha_a}{\alpha_b} \frac{1-\alpha_b-\beta_b}{1-\alpha_a-\beta_a}$. Ecrit en fonction de $\chi_{i0}^\varepsilon (> 0)$, le membre de droite de l'inégalité (74) croît de façon monotone à partir de 0 et tend asymptotiquement vers $x_{ib2} - x_{ia2} (> 0)$, tandis que le membre de gauche croît de façon monotone à partir de $x_{ib2} - x_{ib1} (< 0)$ et tend asymptotiquement vers $x_{ib2} - x_{ia1}$. Or $x_{ia1} > x_{ia2}$, et donc le membre de gauche demeure inférieur au membre de droite $\forall \chi_{i0}^\varepsilon > 0$. L'inégalité (74) n'est donc jamais vérifiée, et donc sous les Hypothèses 1 à 5, la diminution du revenu généré par les entreprises est bien plus élevée en période 2 qu'en période 1.

Département des Sciences Économiques
de l'Université catholique de Louvain
Institut de Recherches Économiques et Sociales

Place Montesquieu, 3
1348 Louvain-la-Neuve, Belgique